

双能 X 线骨密度测量研究

朱俊杰 马成兴 陈羽 刘海涛 唐凤歧*

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥, 230027; * 中国人民解放军总医院, 北京, 100853)

本文在分析核医学骨密度测量技术进展的基础上, 介绍了我国首台 DEXA 的结构组成、实现方法和性能指标。

关键词: 骨密度 测量 DEXA 结构与性能

1 骨密度测量的重要性

中国正在逐步进入老龄化社会, 骨质疏松症与动脉硬化、高血压、糖尿病及肿瘤已并列 5 大老年疾病, 目前我国骨质疏松症患者已达 8400 万人, 特别是我国政府已把骨质疏松与糖尿病、老年性痴呆一起列为三大重点攻关的老年性疾病^[1]。如何系列化发展国产的骨密度测量仪, 并逐步把骨密度测量列为常规普查项目, 已成为人们普遍关心和专家高度重视的问题。对各种测量方法作出评估^[2,3], 在国产骨密度仪上改善性能指标, 达到优良的性能价格比, 也值得进一步深入研究。

骨矿密度 (Bone Mineral Density, BMD) 按不同定义, 有多种表示方法, 如对图 1 所测骨体而言: 设 ρ_b 为单位体积骨质的骨矿物含量, 即 BMD_v (g/cm^3); 按入射 X 线方向, ρ_b 在穿过部分的积分总和为 BMD_i (g/cm^2), 称为该方向的面密度; 此 BMD_i 随横向位置 j 的分布, 称为骨矿物分布曲线; 而 BMD_i 沿 j 方向积分, 可求得单位长度骨内总的骨矿含量 BMC (g/cm); 如骨横径为 BW (cm), 则 BMC/BW 为单位横径的平均骨矿物含量, 称为平均面密度 BMD_A (g/cm^2)。

2 骨密度仪的发展概况^[4]

2.1 早期骨密度测量

最早的骨质密度测量是从 X 光底片的黑化程度上, 反映出骨密度的大概定性情况, 但无法给出精确的定量数值。

2.2 单光子吸收骨密度仪 (Single Photon Absorptiometry, SPA)

利用骨质对 γ 射线的相对吸收算出骨质中的矿物质密度, 能对人体骨密度作定量测量。美国 Norland 公司最早推出了单光子数字式骨密度测量装置 (SPA), 它用 ^{153}Gd 作源, 在挠骨部位测量由该源产生的前后辐射吸收变化, 根据射线与物质相互作用的吸收衰减规律

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho d) = I_0 \exp(-\mu_m BMD_i)$$

通过适当的推算, 可分别求出骨密度 BMD_i 和线密度 BMC 。其中 I_0 、 I 分别对应于人体入射前后的 γ 射线强度, μ_m 为骨质的质量衰变系数, ρ 为其密度, d 为透过部分骨的厚度。

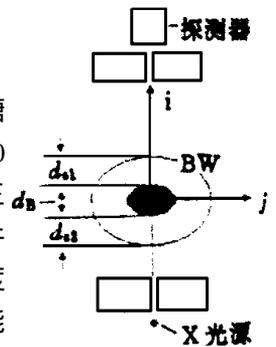


图 1 骨矿测量参数

这类仪器我国也有生产,典型的有北京核仪器厂 FT647 型单能光子骨密度计,中国原子能院的 BMD-4 型骨密度扫描仪和中国科技大学的 GBD-928 型单光子骨矿物质密度测量仪。其源为²⁴¹Am,可长期使用,相对操作方便,对挠骨测定无痛无损,能给出人体手臂的骨密度值,有一定参照性。但医学实践发现,人体骨骼中含钙量降低而导致患病的主要部位是腰椎骨和髌角,而不是前臂的挠骨,再由于 SPA 不能扣除人体软组织对吸收测量的影响,无法直接测量脊椎、髌骨和股骨等深部骨骼,因而不能真正满足临床诊断的需要。国外 SPA 正逐渐被淘汰。

2.3 双能光子吸收骨密度仪(Dual Photon Absorptiometry, DPA)

它利用放射源发出两种不同能量(E_1 、 E_2)的 γ 射线,测量它们各自通过骨骼(B)和软组织(S)的吸收率,即

$$I_1 = I_{01} \exp(-\mu_{1B} M_B - \mu_{1S} M_S)$$

$$I_2 = I_{02} \exp(-\mu_{2B} M_B - \mu_{2S} M_S)$$

式中, I_{01} 、 I_{02} 分别为两种能量(E_1 、 E_2)的入射强度, I_1 、 I_2 则为透射后的输出强度, M_B 、 M_S 分别为骨骼(下称B)和软组织(下称S)的面密度, μ_B 、 μ_S 各为骨和软组织的吸收衰减系数。

通过仪器的运算处理,能消去人体软组织对吸收测量的影响,可无损地测出人体深部骨骼中的骨矿含量,相对测量比较准确。美国Lunar公司最早推出了双能光子数字式骨密度仪,临床应用价值比SPA好。但所用双光子源如¹⁵³Gd源的半衰期不长,需定期更换、校准,使用不便。另外,如源较弱,测量时间太长,而源增强时,成本显著增加,也不利普及。

2.4 双能X线吸收骨密度测量扫描仪(Dual Energy X-ray Absorptiometry Scanner, DEXA或DXA)

美国Hologic公司将X光管替代放射源,用开关切换高压以得到双能X线;Lunar公司则在X管上附加稀土类材料的K边缘吸收片,得到两个能峰。则上述联立方程式改为能量为 E_1 、 E_2 的X线来求解,解得骨的密度 M_B (或BMD_B)为

$$M_B = (\mu_{1S} J_2 - \mu_{2S} J_1) / (\mu_{1S} \mu_{2B} - \mu_{2S} \mu_{1B}), \quad \text{g/cm}^2$$

其中 μ_{1S} 、 μ_{2S} 和 μ_{1B} 、 μ_{2B} 分别为对不同能量的软组织及骨的质量吸收衰减系数,而

$$J_1 = \ln(I_{10}/I_1); J_2 = \ln(I_{20}/I_2)$$

在合适的条件下,也可求得软组织的面密度 M_S (或BMD_S)

$$M_S = (\mu_{1B} J_2 - \mu_{2B} J_1) / (\mu_{1B} \mu_{2S} - \mu_{2B} \mu_{1S}), \quad \text{g/cm}^2$$

这种双能X线(DXA)方式,既免除了放射源在更换、校准时的不便,又提高了有效计数率,减少了统计误差,可快速扫描待测部位(如腰椎、髌骨以至全身躯干),又具有较高的准确度和精密度(通常为1%),而病人所受的剂量很低(为X光照相的1%)。它既可用于一般诊断,也可作为早期普查和监测病情变化以及分析药物疗效之用。

2.5 其他方法

如标准定量CT和周围骨定量CT(QCT、PQCT)法,超声测量和定量超声测量(USA、QUS)法以及数字影像处理法(DIP)等。有些医院利用已有的X线CT或SPECT,也可作骨矿物含量测定。它可将皮质骨的影响分离,单独测量小梁骨的变化,在监测病情微小变化时具有优势,但病人所受剂量比DXA要大100倍,其检测费用也高好多倍,目前不适于普及。

超声测量法的放射剂量为0。目前用于跟骨、胫骨、髌骨及指骨等部位,对骨强度特性也有参考作用,但目前还不能用于腹部腰椎和髌骨的骨密度测量。

综合各种测量法比较,在最近的一次全国骨代谢病及骨矿物测量专题学术会议(1996年)

纪要上,综合了许多专家的意见:在骨矿测量的精确性和准确性方面,以DEXA为优,可以测量腰椎、髌骨、全身骨的骨矿含量,并可应用于动物骨矿测量,是目前较理想的骨矿测量仪器。

3 双能 X 线骨密度仪(DEXA)工作原理和仪器组成(图 2)

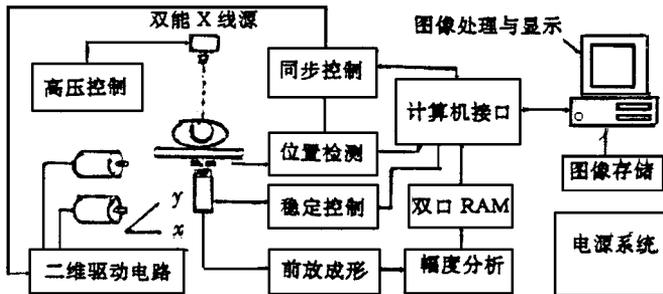


图 2 DEXA 仪器组成

系统由双能 X 光源、检测床、探测器、核电子学数据采集电路、计算机图像处理和二维精密机械扫描机构 6 大部分组成。双能 X 光源是将 X 光管(工作在 80kV)发射的 X 线通过稀土材料 K 边缘吸收片,将 X 线连续谱改变成高能、低能两个能区。高能峰位约为 68keV,低能峰位约为 38keV。图 3 为双能 X 光能谱图。该双能 X 线穿越躺在检测床上的病人身体待测部位后,按人体组织的结构、成分的不同,受到不同的衰减。由探测器将衰减后的 X 射线转变为相应的电信号。经放大、甄别和幅度分析后,得到相应的数字信号,之后存入双端口存储器。然后,经计算机和接口送给计算机进行分析、处理。最后,得到骨密度的图像和数据。

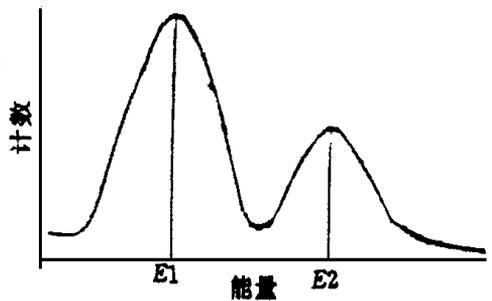


图 3 双能 X 光能谱

为了得到平面二维(x, y)图像,需研制二维精密机械扫描机构,由同步控制电路,根据计算机送来的指令,对照位置检测信号,向步进电机驱动电路发出方向及起停信号,控制相对固定的 X 光源和探测器一同作二维扫描运动,由此探测到人体骨密度的二维分布信息。同时,同步控制电路还要控制数据采集电路的采样起停,以与二维扫描运动同步。

为了提高测量精度,分别采用 X 光源高压稳定控制系统、探测器温度和高压的反馈控制稳峰系统。数据处理采用 586 微机+ DSP 处理系统+ 单片控制机。配置了专用软件包和标准骨参数数据库。并有很大容量,可长期存贮或随时打印病历记录。既可用于普查、诊断,也可用于复查、比较,以提供可靠的图像、数据信息。

4 主要性能与指标的分析讨论^[5]

衡量骨密度仪的性能指标,目前还没有统一的指标、标准来作比较。不同类型的骨密度仪或不同生产厂家的同类仪器,由于对骨密度测定和分析采用不同的标准,往往测量结果不尽相同。为了确保对病人所测数据的可靠性和可比性,同时也便于各医院根据性能价格比来选用骨密度仪,我们提出衡量骨密度仪(DEXA)的主要性能指标:

1) 测量部位: DEXA 可用于腰椎、髌骨以至全身任何部位(可根据需要来选用)。比单光子(SPA)和超声法(USA)更有利于临床确诊。

2) 测量时间: 主要决定于扫描速率。对不同部位及不同的测量采样速率, 所需时间不一样。但扫描速度太快, 统计误差增加, 会影响测量精度; 太慢则增加照射剂量。常用的扫描速率为 $10\sim 60\text{mm/s}$, 测量时间 $2\sim 12\text{min}$ 。

3) 测量精度: 对于相应的测量部位及给定的测量时间, 提高测量精度是很重要的, 测量精度反映了使用该仪器来判断、鉴别骨质疏松与否, 正确诊断由年龄或疾病引起的骨矿丢失的程度的分辨率。实际上, 测量精度与测量部位和扫描速度是互相关连的。1% 的指标可以满足临床应用的需要, 通常视不同部位为 $0.5\%\sim 2\%$, 这比 SPA 与 DPA ($2\%\sim 4\%$) 要好得多。

4) 周围环境剂量和病人所受剂量: 周围环境剂量可采取良好的屏蔽保护措施; 而病人所受剂量, 随各种测量方法而异, 以 DEXA 最小(可小于 $100\mu\text{Sv}$, 最小到 $10\sim 30\mu\text{Sv}$), 而 SPA 则为几百 μSv , QCT 为几 mSv 。

5) 计算机硬软件配置及处理功能: 既能给出图像显示, 又有数据列表, 医生可直接从图像和数据中获取骨密度分析信息。高档的硬件配置, 可以延长更新换代的期限, 而多种软件的开发, 可扩大多部位、多用途的应用与研究, 软件还可不断升级。

6) 性能价格比和投资回收期: 这是医院比较关心的问题。性能最优良的, 价格高; 而价格低的, 性能不理想, 所以从性能价格比衡量比较合适。购置一台骨密度仪需要多久才能回收投资? 以 SPA 来看, 如病人每次交费 50 元, 约需 1500 个病人, 一般 $0.5\sim 1$ 年可收回投资。而 DEXA, 病人每次交费多 $2\sim 4$ 倍, 测量速度可快 $2\sim 3$ 倍, 实际上 $1\sim 2$ 年也可回收成本。

5 展望

1) 比较各种骨密度测量技术方法, 可看出: DEXA 精度高、速度快、剂量小、无创伤, 可测人体任何部位, 诊断灵敏、准确, 临床应用有效。目前, 世界上已发展到 3000 台, 推广形势看好。结合我国人口众多, 到 2000 年即将进入老龄化社会的现实情况, 应把骨质疏松的防治列为优先项目, 尽快发展适合我国国情的 DEXA 骨密度仪, 争取 $3\sim 5$ 年内向省市级医院推广, 在 $5\sim 10$ 年内向地县级医院普及。

2) 进一步开发仪器功能: 利用现有配置, 在解联立方程组中, 既可消去软组织影响, 求出骨量密度; 也可在 DSP 计算中, 通过消掉骨密度求出软组织分布, 使这种技术得到更广泛应用。

参 考 文 献

- 1 刘忠厚, 王洪复, 刘京萍等. 骨骼生长规律和原发性骨质疏松症预诊的研究. 中国骨质疏松杂志, 1995 1 (1):
- 2 Genant HK, 吴春营, 李皎等. 非侵入性方法对骨矿和骨结构的分析. 中国骨质疏松杂志, 1995 1(1):
- 3 Genant HK, Kuijk C. Bone Densitometry: Current status. Proc 1 Inter Sym on Ost & Met Bone Dis [ISO 92] Editor: Liu Zhonghou. 219.
- 4 朱俊杰, 马成兴. 核医学骨密度仪测量技术进展. 第 6 届全国核医学电子学学术会议论文集. 四川江油: 1995.
- 5 朱俊杰, 马成兴, 陈羽等. 骨密度测量方法和性能指标的探讨. 第 3 次全国老年代谢性骨病和骨密度测量学术交流会. 上海: 1996.

(1997 年 8 月 12 日 收到)

(下转第 84 页, Continued on page 84)

(1997年11月3日 收到)

Research and Construction of ^{60}Co Container Inspection System

An Jigang Zhou Liye Liu Yisi Wu Haifeng Wu Zhifang
Wang Liqiang Zheng Yuanshui Xiang Xincheng Li Furong
Gao Baozeng Sheng Chunfa

(Institute of Nuclear Energy Technology (NET), Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper presents a special kind of container inspection system, in which a ^{60}Co industrial radiography source of 3.7~11.1 TBq is used as the radiation source. By the adoption of high sensitivity array detector and other technical solutions, this ^{60}Co container inspection system possesses nice properties. Its "image quality indicator (IQI)" and "contrast indicator (CI)" for 100mm steel plate are equal to 0.7% and 2.5% respectively. Its "steel penetration (SP)" is about 240mm. The ^{60}Co container inspection is much cheaper and more reliable than accelerator inspection system, and the dimensions for its installation and operation is much smaller. The "SP" of ^{60}Co system is much higher than that of X-ray machine inspection system.

(Key Words: ^{60}Co source Container Inspection system Anti-smuggling)

【作者简介】

安继刚,男,59岁,研究员,博导;周立业,男,34岁,副研,硕士;刘以思,男,58岁,研究员;邬海峰,男,29岁,助研,双学士;吴志芳,男,29岁,助研,硕士;王立强,男,27岁,研实,硕士;郑沅水,男,28岁,研实,硕士;向新程,男,30岁,助研,硕士;李富荣,男,47岁,工程师;高宝增,男,53岁,工程师;盛春发,男,55岁,工程师。

(上接第88页,Continued from page 88)

DEXA: A Study of Measurement and Instrument

Zhu Junjie Ma Chengxing Chen Yu Liu Haitao Tang Fengqi*

(Dept of Modern Physics, Uni of Science and Technology of China,
Hefei, 230027; *General Hospital of PAL, Beijing, 100853)

Abstract

In this paper we discuss the factors of DEXA's performance and the development of technique. An instrument designed by us is introduced too.

(Key Words: Bone mineral density Measurement DEXA Structure and performance)

【作者简介】

朱俊杰,男,59岁,博士生指导教师;马成兴,男,56岁,高工;陈羽,男,39岁,在职博士生;刘海涛,男,29岁,博士生;唐凤歧,男,60岁,高工。